

und  $\approx 0$  für  $n$  ungerade; durch Aufsummation folgt

$$\langle \exp\{i(N-N_0)\varphi\} \rangle_0 \approx \exp\{-2AV\varphi^2\} + \exp\{-2AV(\varphi-\pi)^2\} \quad (\text{A.13})$$

[beachte Bemerkung im Anschluß an Gl. (A.10)!]. Auswertung des Integrals in Gl. (A.4) führt schließlich auf das in Gl. (A.5) angegebene Resultat.

In Analogie zu Gl. (A.4) gilt

$$g_{N'-2}^* g_{N'} \langle N' - 2 | \psi_-({\mathbf r}) \psi_+({\mathbf r}') | N' \rangle \quad (\text{A.14})$$

$$= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi \langle \psi_-({\mathbf r}) \psi_+({\mathbf r}') \exp\{i(N-N')\varphi\} \rangle_0.$$

Durch Auswertung der rechten Seite nach den gleichen Methoden in der Umgebung von  $N=N_0$  bestätigt man, etwa für reell gewählte  $g_{N'}$ , Gl. (2.3).

## Zur Supraleitung von Tantalkarbid und Tantalkarbid mit Kobaltzusatz

Von GÜNTER LAUTZ \* und DETLEF SCHNEIDER

Aus dem Institut für Technische Physik der Technischen Hochschule Braunschweig  
(Z. Naturforsch. 17 a, 54–59 [1962]; eingegangen am 29. November 1961)

Magnetische Messungen der Flußverdrängung in Sinterkörpern aus dem Tantalkarbid TaC und TaC mit einem 1-proz. Co-Zusatz zeigen, daß diese Substanzen zwischen 2,4 und 3,6 °K bzw. 4,2 und 5,3 °K supraleitend werden. Der MEISSNER-Effekt erfaßt 97 bzw. 99% des Volumens der Versuchssproben. Die Zusammenhänge zwischen den Übergangstemperaturen und der Kristallstruktur, dem metallographischen Gefüge, der Fehlordnung und der magnetischen Meßfeldstärke werden ausführlich erläutert. Sorgfältige Strukturuntersuchungen erweisen, daß das TaC fast stöchiometrisch zusammengesetzt ist und nur einen geringen Kohlenstoffunderschub (47 Atom-% C) besitzt. Die Meßergebnisse stehen im Einklang mit den von MATHIAS aufgestellten Regeln über den Einfluß der Masse der Gitterbausteine, des Volumens der Elementarzelle und der Valenzelektronenzahl/Atom.

In dem vergangenen Jahrzehnt ist das elektrische Verhalten einer großen Zahl von Einlagerungsverbindungen der Übergangsmetalle bei tiefen Temperaturen untersucht worden. Nächst den Nitriden zeigen die Karbide eine starke Tendenz, supraleitend zu werden. Die Höhe der Sprungtemperatur hängt in empfindlicher Weise von der technologischen Beschaffenheit der Versuchssproben ab. Aus der Art der Verbindungsbildung ergibt sich schon, daß es außerordentlich schwierig ist, stöchiometrisch zusammengesetzte Substanzen zu erhalten. Die Ergebnisse der Supraleitungsmessungen differieren daher von Autor zu Autor.

In den nachstehend beschriebenen Untersuchungen wird über die Eigenschaften einer derartigen Verbindung, dem Tantalkarbid TaC, berichtet, das nahezu stöchiometrisch aus Ta und C im äquiatomaren Verhältnis gebildet ist. Außerdem sollen Versuche an TaC mit einem 1-proz. Kobaltzusatz erläutert werden. Bei diesen Proben ist eine Beeinflussung

der Supraleitung durch die großen magnetischen Momente des Kobalts zu vermuten. Fernerhin hat das Kobalt auch die bei Hartmetallwerkstoffen vielfach benutzte Eigenschaft, beim Herstellungsprozeß diffusionsfördernd zu wirken und daher das Verhalten der Grundsubstanz zu variieren.

### Bisherige Ergebnisse

MEISSNER, FRANZ und WESTERHOFF<sup>1,2</sup> haben an verschiedenen Übergangsmetall-Karbiden den Eintritt der Supraleitung aus dem Verschwinden des elektrischen Widerstandes erschlossen. Für gesintertes TaC wird eine Übergangstemperatur von 9,4 und für einen polykristallinen Draht von 9,5 °K angegeben. Magnetische Messungen von ZIEGLER und YOUNG<sup>3</sup> an pulverförmigem Material bis zu 1,8 °K und an erschmolzenen Proben von HARDY und HULM<sup>4</sup> bis zu 1,2 °K herab haben keinen MEISSNER-Effekt gezeigt. Andererseits finden MATHIAS, WOOD, CORENZWIT und BALA<sup>5</sup> in kubischen Mischphasen aus

\* Jetzt Institut für Reine und Angewandte Kernphysik, Abteilung Festkörperphysik, Universität Kiel.

<sup>1</sup> W. MEISSNER u. H. FRANZ, Z. Phys. 65, 30 [1930].

<sup>2</sup> W. MEISSNER, H. FRANZ u. H. WESTERHOFF, Z. Phys. 75, 521 [1932].

<sup>3</sup> W. T. ZIEGLER u. R. A. YOUNG, Phys. Rev. 90, 115 [1953].

<sup>4</sup> G. F. HARDY u. J. K. HULM, Phys. Rev. 93, 1004 [1954].

<sup>5</sup> B. T. MATHIAS, E. A. WOOD, E. CORENZWIT u. V. B. BALA, J. Phys. Chem. Solids 1, 188 [1956].



Bezugs-substanz X	$T_c(X)^4$ in °K	$a(X)^9$ in Å	$\bar{M}(X)$	VE-Zahl/ Atom X	$\sqrt{\frac{M(X)}{M(TaC)}}$	$(\frac{a(TaC)}{a(X)})^{13}$	$T_c'$ in °K
NbC	6,0	4,45	52,5	4,5	0,74	1,01	4,5
NbN	14,7	4,4	53,5	5	0,75	1,18	13,0
VN	7,5	4,13	32,5	5	0,58	2,72	11,8

Tab. 1.

TaC und WC Supraleitung mit Sprungtemperaturen über 10 °K.

Überblickt man das Auftreten der Supraleitung in einem größeren Zusammenhang, so sollte man bei fast gleichen Strukturen, nicht zu starken Abweichungen in der Masse der Gitterbausteine und gleicher Anzahl von Valenzelektronen/Atom ein gleichartiges Verhalten in bezug auf die Existenz oder Nichtexistenz einer supraleitenden Phase erwarten. Dem TaC ist das supraleitende NbC in der geschilderten Weise adäquat, das eine auch magnetisch bestätigte Sprungtemperatur  $T_c = 6,0$  °K besitzt. Berücksichtigt man kleine Unterschiede in den Gitterkonstanten und den Atommassen der Bausteine, so läßt sich nach MATTHIAS<sup>6-8</sup> der eventuelle  $T_c$ -Wert nach der bei den Elementen gut erfüllten Beziehung

$$T_c \sim a^{13} / \sqrt{M},$$

( $a$  = Gitterkonstante,  $M$  = mittleres Atomgewicht je Baustein) grob abschätzen. Aus den Daten der supraleitenden, kubischen Nitride und Karbide von Elementen aus der gleichen Spalte des Periodischen Systems wie Ta ergeben sich die in Tab. 1 enthaltenen Schätzwerte  $T_c'$  für TaC zwischen 4,5 und 13 °K. Der Einfluß der Valenzelektronenzahl läßt eine Übergangstemperatur in der Nähe von 4,5 °K vermuten.

Diese Betrachtung ist keineswegs zwingend. Angesichts des Erfolges der hier benutzten MATTHIAS-Regeln bei vielen anderen Substanzreihen und der bestehenden Diskrepanz in den experimentellen Resultaten erscheinen aber weitere Messungen am TaC als notwendig.

<sup>6</sup> B. T. MATTHIAS, Progr. Low Temp. Phys. Bd. 2, North Holland Publ. Comp., Amsterdam 1957, S. 138.

<sup>7</sup> B. T. MATTHIAS, Phys. Rev. **92**, 874 [1953].

<sup>8</sup> B. T. MATTHIAS, Phys. Rev. **97**, 74 [1955].

<sup>9</sup> LANDOLT-BÖRNSTEIN, Atom- und Molekularphysik, Teil 4, Kristalle, Springer-Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1955.

<sup>10</sup> Für die Überlassung der Proben möchten wir Herrn Dir. Dr. O. RÜDIGER, Fried. Krupp Widia-Fabrik, Versuchsanstalt, vielmals danken.

### Herstellung des TaC und Strukturuntersuchungen

Für die Versuche standen Sinterstäbe aus TaC und TaC mit 1% Co (5,9 mm Ø, 38 mm lang) zur Verfügung<sup>10</sup>. Die durch Karburieren von Tantalpulver, anschließendem Sintern und Heißpressen bei 1700 °K erhaltenen Körper wurden in Wasser abgeschreckt. Eine spektroskopische Analyse ergab, daß der Nb-Gehalt der Proben unter der Nachweisgrenze (0,015%) lag.

Zur Beurteilung des inneren Gefüges wurden von je einer TaC- und (TaC + Co)-Probe metallographische Schliffbilder angefertigt<sup>11</sup> (Abb. 1). Nach sorgfältigem Polieren und Ätzen mit einer Lösung aus drei Teilen Flußsäure und einem Teil Salpetersäure zeigt sich ein aufgelockertes Gefüge mit Körnern zwischen 1 und 10 μ Durchmesser. Da durch das Ätzverfahren sowohl das Kobalt herausgelöst als auch das TaC selbst angegriffen werden, erscheinen die geätzten Schritte poröser als sie in Wirklichkeit sind. Ein Einfluß des Co-Zusatzes ist nicht erkennbar. Die Form der Körner korrespondiert zu ähnlichen Aufnahmen vom TaC von ELLINGER<sup>12</sup> und ist damit von der nadelartigen Struktur des TaC<sub>2</sub> deutlich verschieden.

Alle Proben lieferten unabhängig vom Co-Zusatz das gleiche DEBYE-SCHERRER-Diagramm eines kubisch flächenzentrierten Gitters vom NaCl-Typus (Abb. 2). Zur Bestimmung der Gitterkonstanten wurden nur die Reflexe höchster Ordnung benutzt<sup>13</sup>. Bei einer Vergleichsgenauigkeit von ± 0,0007 Å ergab sich durchweg  $a = 4,455 \pm 0,001$  Å, ein Wert, der innerhalb der Fehlergrenze zu den Ergebnissen von KRAINER und KONOPICKY<sup>14</sup> bzw. NORTON und

<sup>11</sup> Abb. 1 a—f und 2 auf Tafel S. 56 a, b. Die hier wiedergegebenen Schliffbilder wurden in der Friedr. Krupp Widia-Fabrik, Versuchsanstalt, hergestellt.

<sup>12</sup> F. H. ELLINGER, Trans. Amer. Soc. Mech. Engrs. **31**, 89 [1943].

<sup>13</sup> D. SCHNEIDER, Diplomarbeit, Braunschweig 1960.

<sup>14</sup> H. KRAINER u. K. KONOPICKY, Berg.hüttenmänn. Monatsh. **92**, 166 [1947].

MOWRY<sup>15</sup> paßt. Eine Abschätzung der Linienintensitäten steht in recht guter Übereinstimmung mit den Meßresultaten.

Nach den Andeutungen von NOWOTNY und KIEFFER<sup>16</sup> und den experimentellen Befunden von SMIRNOVA und ORMONT<sup>17</sup> kann aus dem Wert der Gitterkonstanten auf den Kohlenstoffgehalt des TaC geschlossen werden. Zwischen  $TaC_{0,58}$  und  $TaC_{0,91}$  (entsprechend 36,7 bis 47,6 Atom-% C) wächst  $a$  annähernd linear mit steigender Kohlenstoffkonzentration von  $4.420_6$  bis  $4.456_4$  Å an. Damit beträgt der Kohlenstoffgehalt der vorliegenden Versuchsproben 47%, entsprechend der Formel<sup>18</sup>  $TaC_{0,9}$ .

### Meßanordnung

Die Messungen wurden in einem Ganzmetallthermostaten<sup>19</sup> durchgeführt, der nach dem SIMONSEN'schen Prinzip arbeitete und durch sorgfältige Drosselung des hoch komprimierten Heliums, insbesondere oberhalb  $4,2^{\circ}K$ , genaue Temperatureinstellungen ermöglichte. Die Temperaturbestimmung erfolgte mit zwei Kohleschichtwiderständen, die sich dicht oberhalb bzw. unterhalb des TaC-Stäbchens in gutem Wärmekontakt mit der Meßprobe in einer Helium-Atmosphäre befanden<sup>13</sup>.

Zur Eichung der Widerstände wurden die Fixtemperaturen des Wasserstofftripelpunktes, des Heliumsiedepunktes und der in der Abb. 3 angegebenen Sprungtemperaturen von Pb, Sn, In, Tl benutzt. Die Bezugsmetalle lagen in spektroskopisch reiner Form vor, wurden in Drahtform gebracht, zur Beseitigung von mechanischen Spannungseinflüssen längere Zeit bei Zimmertemperatur gelagert und spannungsfrei auf Haltekreuzen befestigt. Die Breite des jeweiligen Sprungintervales gestattete eine Festlegung der zugehörigen Sprungtemperatur auf  $\pm 0,01^{\circ}K$ . Durch Kontrollen wurde sichergestellt, daß die Stromstärkeabhängigkeit der  $T_c$ -Werte unter dieser Fehlergrenze blieb. Aus der Abb. 3 ist ersichtlich, daß die Kohlewiderstände unterhalb  $4^{\circ}K$  exponentiell ansteigen, so daß eine Interpolation der Eichwerte ohne Schwierigkeiten möglich ist.

Der magnetische Verdrängungseffekt wurde in der üblichen Weise durch Ein- und Ausschalten eines schwachen, longitudinalen und innerhalb 0,5% homogenen, äußeren Magnetfeldes über den ballistischen Spannungs-

<sup>15</sup> J. T. NORTON u. A. L. MOWRY, Trans. Amer. Inst. Min. Metall. Engrs. **185**, 133 [1949].

<sup>16</sup> H. NOWOTNY u. R. KIEFFER, Z. Metallkde. **38**, 257 [1947].

<sup>17</sup> W. I. SMIRNOVA u. B. F. ORMONT, Dokl. Akad. Nauk SSSR **96**, 557 [1954].

<sup>18</sup> Nach ROBINS (Phys. Chem. Met. Solutions and Intermetal. Comp., Juni 1958, Teddington; Angew. Chem. **70**, 474 [1958]), kann kubisches Tantalkarbid höchstens bis zur Zusammensetzung  $TaC_{0,96}$  Kohlenstoff aufnehmen. Bei einer höheren Konzentration sollte die Kristallstruktur in die des MoC bzw. WC umgewandelt werden.

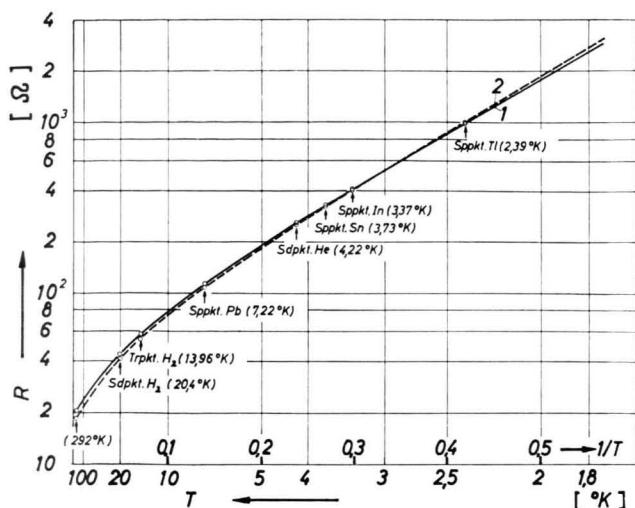


Abb. 3. Eichkurven des unteren (1) und des oberen (2) Kohle-Widerstands-Thermometers. Sprungtemperaturen nach Anm.<sup>17</sup>

Der von MEISSNER und NÄBAUER für In angegebene Wert von  $3,40^{\circ}K$  ist offenbar zu groß, da er sich nicht in den Kurvenverlauf einpassen läßt. Hier wurde der Wert von ONNES u. TUYN, Comm. Leiden 167 a, zugrunde gelegt.

stoß gemessen, der in der unmittelbar auf die Sinterstäbe gewickelten Induktionsspule entstand. Das nicht von der Probe erfüllte tote Volumen der Induktionsspule ergab sich zu 6,5%. Infolge des großen Verhältnisses Länge/Durchmesser lag der äußere Entmagnetisierungsfaktor unter 0,04. Da die magnetische Meßfeldstärke (7,5 bis 22,5 Oe) kleiner als 10% der kritischen Feldstärke bei  $0^{\circ}K$  war, konnten die obere Grenze der durch das endliche Magnetfeld verursachten Verschiebung der Sprungtemperaturen nach HARDY und HULM<sup>4</sup> für den vorliegenden Entmagnetisierungsfaktor zu  $0,05 T_c$  und die Breite des Sprungintervales zu weniger als  $T_c/500$  geschätzt werden.

### Meßergebnisse

Einige Aufschlüsse über die elektrischen Eigenschaften der TaC-Sinterstäbe<sup>21-23</sup> vermitteln die Temperaturabhängigkeit des von geometrischen Größen unabhängigen Widerstandsverhältnisses

<sup>19</sup> G. FINKE u. G. LAUTZ, Z. Naturforsch. **14a**, 62 [1959].

<sup>20</sup> LANDOLT-BÖRNSTEIN, Elektrische Eigenschaften der Materie, Teil 6, Springer-Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1959.

<sup>21</sup> G. V. SAMSONOV, Zh. tekh. Fiz. **26**, 716 [1956]; Sov. Phys. Tech. Phys. **1**, 695 [1957].

<sup>22</sup> G. V. SAMSONOV u. V. B. ROZINOV, Dokl. Akad. Nauk Ukr. SSR, S. 247, 1957.

<sup>23</sup> S. N. L'vov, V. F. NEMCHENKO u. G. V. SAMSONOV, Dokl. Akad. Nauk SSSR **135**, 577 [1960]; Sov. Phys. Doklady **5**, 1334 [1961].

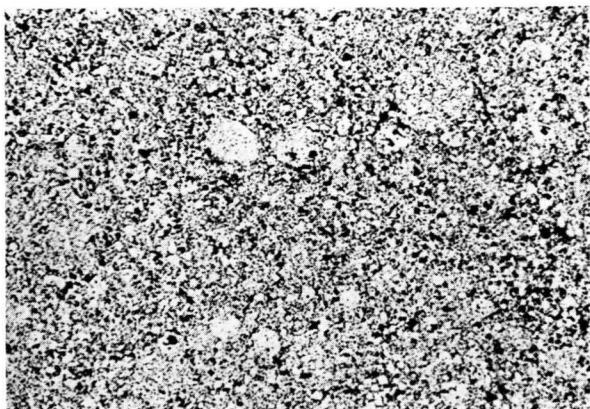


Abb. 1 a. TaC, poliert. Vergr. 100-fach.

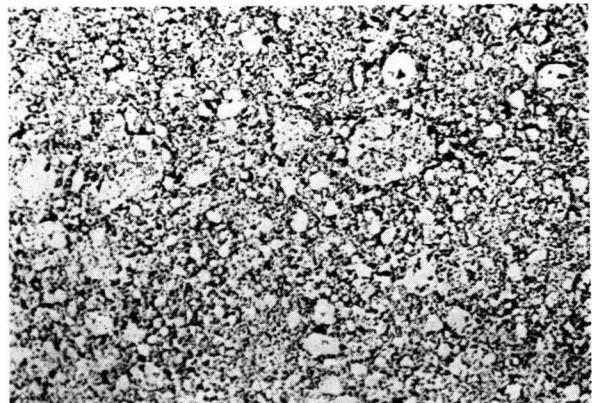


Abb. 1 d. TaC + 1% Co, poliert. Vergr. 100-fach.

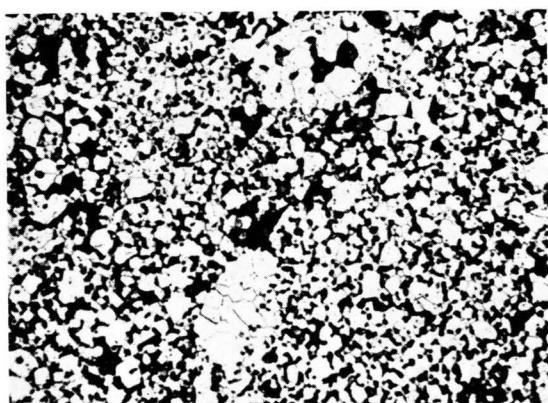


Abb. 1 b. TaC, poliert und geätzt. Vergr. 375-fach.

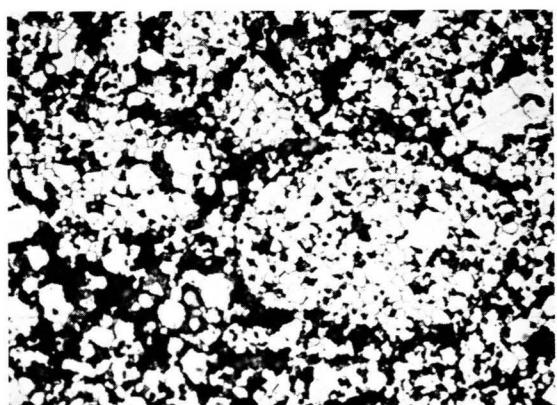


Abb. 1 e. TaC + 1% Co, poliert und geätzt. Vergr. 375-fach.

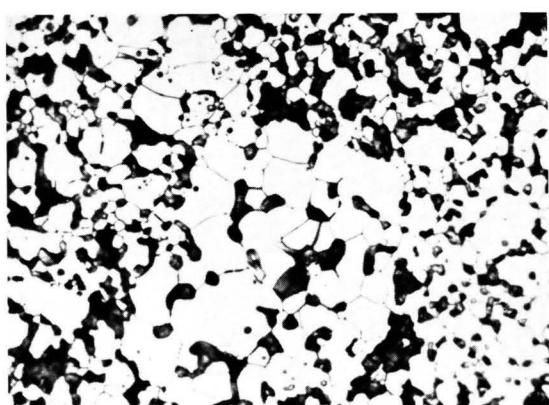


Abb. 1 c. TaC, poliert und geätzt. Vergr. 750-fach.

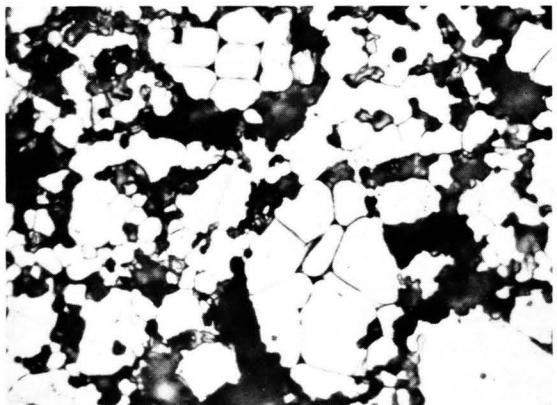


Abb. 1 f. TaC + 1% Co, poliert und geätzt. Vergr. 750-fach.

Abb. 1. Schliffbilder.

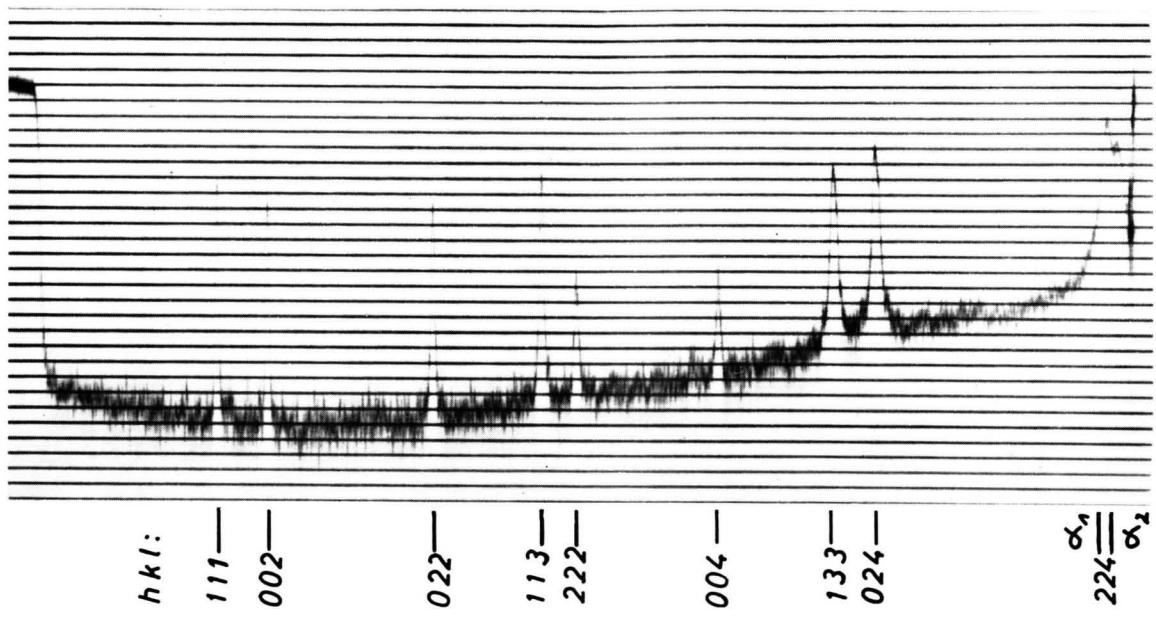


Abb. 2. Photometerkurve eines DEBYE-SCHERRER-Diagramms von TaC, Probe c.

Probe	Raumtemperatur in °C	$r_{RT}$ in %	Temperatur des flüssigen Stick- stoff in °K	$r_{78}$ in %	$r_{20,4}$ in %
TaC a b c	21,4	104,1	77,80	58,06	48,36
		106,1		55,97	45,91
		103,4		60,68	51,99
TaC + 1% Co a b c	17,4	104,3	77,82	56,08	46,11
		104,2		56,73	46,94
		104,3		56,76	46,93

Tab. 2.

$r_T = R(T)/R(273)$  (Tab. 2)<sup>24</sup>. Die  $r_T$ -Werte nehmen bis zu 20,4 °K im Mittel linear ab, bleiben aber etwas größer als die von MEISSNER und FRANZ<sup>1</sup> bei 77,69 °K mit 47,2% und 20,48 °K mit 38,4% ermittelten Werte einer Sinterprobe.

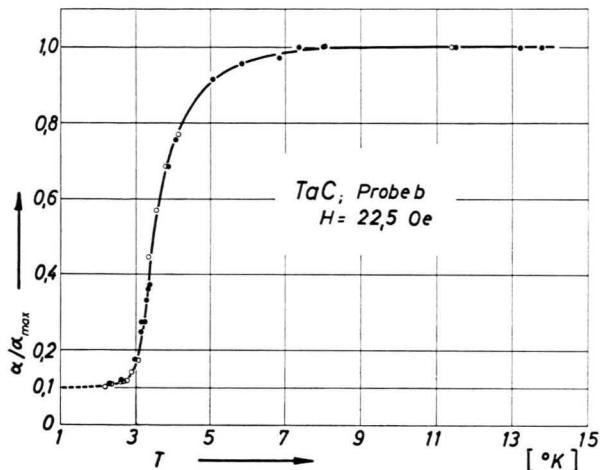


Abb. 4. Übergangskurve der TaC-Probe b bei 22,5 Oe; ○ bei Abkühlung, ● beim Aufwärmen gemessen.

Alle Versuchsproben aus TaC und TaC + 1% Co werden bei den vorliegenden Versuchsreihen supra-leitend. In Abb. 4 ist die hysteresefreie Übergangskurve einer TaC-Probe ohne Co-Zusatz dargestellt. Da das Verhältnis des gemessenen Galvanometerausschlages zum maximal möglichen die Ordinate der Abbildung ist, erkennt man, daß die Flußverdrängung bei den tiefsten Temperaturen 90% des umschlossenen Volumens ausmacht. Der Beginn des Überganges verläuft relativ flach, der zweite Teil der Sprungkurve ist hier wie auch bei den folgenden Abbildungen deutlich steiler.

Abb. 5 zeigt an der Probe c den Einfluß des äußeren Magnetfeldes zwischen 7,5 Oe und 120 Oe. Er-

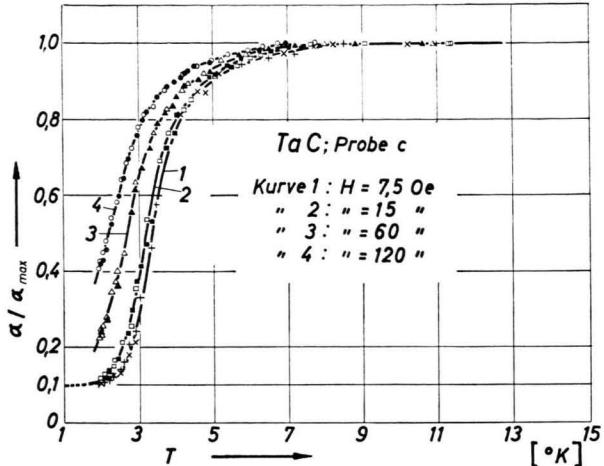


Abb. 5. Übergangskurve der TaC-Probe c bei verschiedenen Meßfeldstärken; ○△□+ jeweils beim Abkühlen, ●▲■× jeweils beim Aufwärmen gemessen.

mittelt man aus dieser Darstellung diejenigen Temperaturen, bei denen jeweils die Hälfte der möglichen Flußverdrängung auftritt, so ergibt sich in diesem Feldstärkenbereich eine fast lineare Schwellwertkurve mit der Neigung  $-100 \text{ Oe}/\text{°K}$ .

In den Abb. 6 und 7 sind die entsprechenden Ergebnisse für je zwei mit Co versetzte TaC-Proben wiedergegeben. Diese Kurven sind zu höheren Temperaturen verschoben, die Übergangsintervalle erscheinen schmäler (vgl. jedoch Tab. 3). De facto setzt der Abfall nur steiler ein als bei reinem TaC. Der Minimalausschlag erreicht fast 7%.

In Tab. 3 sind die verschiedenen Ergebnisse zusammengefaßt. Da es schwierig ist, bei breiten Übergangsbereichen eine bestimmte Temperatur als die Sprungtemperatur zu bezeichnen, sind die  $T$ -Werte für  $(\alpha - \alpha_{\min})/\alpha_{\max} = 0,05$  bzw. 0,50 bzw. 0,95 für eine Meßfeldstärke von 22,5 Oe angegeben worden. Eine Korrektur und Extrapolation der Meßwerte erscheint angesichts der großen Streuung im Verhalten der Sinterstäbe untereinander als wenig sinnvoll.

<sup>24</sup> Teilweise nach Messungen von A. FUNCK.

Probe	$T(95\%)$	$T(50\%)$	$T(5\%)$	$T(50\%) - T(95\%)$	$T(5\%) - T(50\%)$	$T(5\%) - T(95\%)$
TaC a c b	1,7	2,40	5,3	0,7	2,9	3,6
	2,5	3,10	5,8	0,6	2,7	3,3
	3,0	3,55	6,0	0,6	2,4	3,0
TaC + 1% Co b c a	2,9	4,20	6,7	1,3	2,5	3,8
	4,0	4,80	7,1	0,8	2,3	3,1
	4,4	5,25	7,0	0,8	1,7	2,5

Tab. 3.

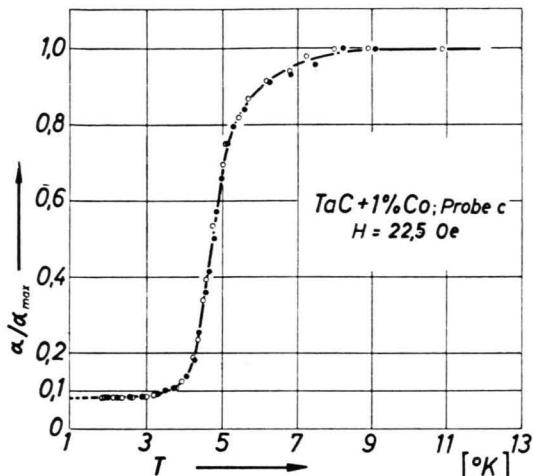


Abb. 6. Übergangskurve der (TaC+1% Co)-Probe c bei 22,5 Oe; ○ beim Abkühlen, ● beim Aufwärmen gemessen.

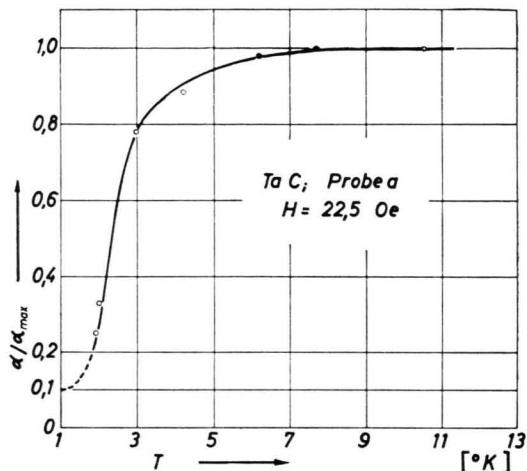


Abb. 8. Übergangskurve der TaC-Probe a; ○ beim Abkühlen, ● beim Aufwärmen vor dem Abschleifen gemessen. Ausgezogene Kurve nach dem Abschleifen vermessen.

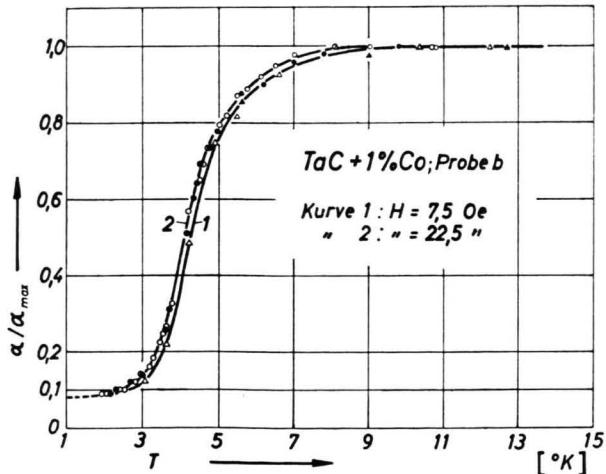


Abb. 7. Übergangskurve der (TaC+1% Co)-Probe b bei verschiedenen Meßfeldstärken; ○ △ jeweils beim Abkühlen, ● ▲ jeweils beim Aufwärmen gemessen.

An der Probe TaC a ist der Einfluß einer Oberflächenbearbeitung und -abtragung untersucht worden. Abb. 8 läßt erkennen, daß die Übergangskurve

auch beim Abschleifen einer 0,5 mm dicken Schicht nicht verändert wird.

### Diskussion der Meßresultate

Nach den metallographischen, strukturellen und analytischen Befunden bestehen alle untersuchten Proben aus der dem Monokarbid TaC zugeordneten Phase. Die Substanzen sind bis auf einen geringfügigen Kohlenstoffunterschluß stöchiometrisch zusammengesetzt. Es ist sicher, daß das supraleitende  $\text{Ta}_2\text{C}$  nicht vorhanden ist.

Aus der Abschätzung des toten Volumens zu 6,5% folgt mit der experimentell ermittelten effektiven Permeabilität, daß das Volumen der Sinterstäbe zu 97% bei den reinen TaC-Proben und zu mindestens 99% bei den Proben mit Co-Zusatz bei den tiefsten Meßtemperaturen frei vom Magnetfluß wird. Offenbar werden die kleinen Poren und Löcher

<sup>25</sup> G. LAUTZ u. D. SCHNEIDER, Z. Naturforschg. **16 a**, 1368 [1961].

in den Stäben vollständig magnetisch abgeschirmt. Daß nicht nur eine dünne Oberflächenschicht anderer Zusammensetzung oder Struktur supraleitend wird und den gesamten Probenkern abschirmt, wird durch die Kontrollversuche an abgeschliffenen Stäben erwiesen.

Durch Pulverisieren des Materials wird der Zusammenhalt der einzelnen Körner aufgehoben. Wie die Untersuchungen von LAUTZ und SCHNEIDER<sup>25</sup> an einer lockeren Pulverschüttung aus TaC zeigen, muß man auch bei diesen Versuchen unter Berücksichtigung des vergrößerten Totvolumens einen vollständigen MEISSNER-Effekt annehmen. Damit ist an der vollständigen Supraleitung der vorliegenden Versuchproben nicht zu zweifeln.

Die Höhe der Sprungtemperaturen steht in keinem direkten Zusammenhang mit den Widerstandsverhältnissen im Gebiet der Normaleitung. Bei den quantitativen Unterschieden im Verhalten der Einzelproben ist ein Einfluß der Fehlordnung nicht auszuschließen. Verunreinigungen dürften nach der Art des Herstellungsverfahrens und den spektralanalytischen Ergebnissen von völlig untergeordneter Bedeutung sein. Wahrscheinlich wirkt sich der kleine Kohlenstoffunterschluß begünstigend für die Supraleitung aus, da dadurch die mittlere Valenzelektronenzahl/Atom von 4,5 näher an den Optimalwert 5 heranrückt. Diese Deutung steht auch mit den Messungen von MATTHIAS und Mitarbeitern<sup>5</sup> über die Supraleitung im System TaC – WC im Einklang.

Über die Einlagerung des Co können selbst unter

Berücksichtigung des elektrischen Verhaltens der Proben keine Angaben gemacht werden. Der Einfluß auf den Übergang zur Supraleitung liegt im Sinne einer Sprungpunkterhöhung. Ob diese Einwirkung magnetischer Art ist oder durch eine nichterfaßte Gefügeänderung oder durch die Veränderung der mittleren Elektronenzahl/Atom bedingt wird, kann erst durch weitere Untersuchungen geklärt werden.

Die Form und Breite der Sprungkurven steht in engem Zusammenhang mit dem Gefügeaufbau. Der erste Abfall des Magnetflusses beim Eintritt der Supraleitung ist an die Einzelkörner und deren Verhalten geknüpft. Der letzte Teil der Sprungkurve wird hingegen mit der Ausbildung von Abschirmströmen in der Umgebung von Poren in Zusammenhang stehen und daher mit weiterer Temperaturverminderung bei fast vollständiger Supraleitung rascher erfolgen als der durch innere Entmagnetisierungseffekte beeinflußte Übergang der Körner selbst.

Aus der Magnetfeldabhängigkeit der Übergangstemperaturen kann nach HARDY und HULM<sup>4</sup> die kritische Feldstärke bei 0 °K zu größerenordnungsmäßig 200 Oe geschätzt werden. Das ist für harte Supraleiter ein außergewöhnlich niedriger Wert.

Herrn Prof. Dr. E. JUST danken wir für die Möglichkeit zur Durchführung dieser Untersuchungen. Unser besonderer Dank gilt Herrn Dir. Dr. O. RÜDIGER, Fried. Krupp Widia-Fabrik, Versuchsanstalt, der die vorliegende Arbeit durch die Überlassung der Versuchspuren unterstützt hat. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft hat die Versuche durch apparative Leihgaben gefördert.

## Durchgang von Mikrowellen durch ebene Plasmaschichten

Von K. HAIN

Institut für Plasmaphysik, Garching bei München,

und M. TUTTER

Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik, München  
(Z. Naturforsch. 17 a, 59—64 [1962]; eingegangen am 10. November 1961)

The reflection and transmission of a plane electromagnetic wave propagating through a plane plasma slab with and without a static magnetic field is computed.

Für mikrowellendiagnostische Untersuchungen des Plasmas ist es wichtig, den Einfluß von Parametern, wie räumlicher ElektronendichteVerteilung, Stoßfrequenz und Magnetfeld, auf direkt meßbare Größen zu kennen. Bei den meisten experimentellen Anord-

nungen befindet sich das Plasma im Ausbreitungs weg der Mikrowelle zwischen zwei Hornantennen. Die praktisch vorkommenden Geometrien lassen sich häufig auf den im folgenden behandelten einfachen Fall zurückführen: